

УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2018.45.32

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ ВСТАНОВЛЕНІ КОМПЕНСАТОРІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Є. В. ВЕРБИЦЬКИЙ*, К. А. ХОДАКОВ

кафедра промислової електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА

*e-mail: verbitskiy@bigmir.net

АНОТАЦІЯ Збільшення кількості електронних пристроїв, під'єднаних до електромереж змінного струму, збільшує частку перехідних процесів в мережі та обумовлює динамічний характер, спожитої від мережі енергії. Це явище збільшує обсяг генерування реактивної потужності, що має негативний вплив на обладнання електричної мережі і збільшує втрати енергії під час її транспортування до споживача. Зазвичай для зменшення обсягу генерованої реактивної потужності встановлюють компенсацію реактивної потужності. Залежно від типу реактивної потужності встановлюють один з декількох можливих типів компенсаторів. У статті аналізується вартість та ефективність використання компенсаторів різного типу. У статті проаналізовано теоретичні аспекти компенсації реактивної потужності. Повна електрична потужність розділена на пасивну і активну, визначено обмеження щодо струму компенсатора відповідно до вимог щодо параметрів якості електроенергії. В дослідженні також враховано зменшення вихідної потужності генератора електромережі завдяки компенсації реактивної потужності. Запропоновано використання аналізатора параметрів якості електроенергії як ефективний засіб для визначення типу та потужності компенсатора. Аналізатор виготовлено та протестовано на декількох типах розповсюджених навантажень. Розроблено простий алгоритм для розрахунку параметрів компенсаторів реактивної потужності. При дослідженні враховано коливання частоти мережі у реальних електромережах. Алгоритм застосовано для таких навантажень: лінійного реактивного, нелінійного реактивного і динамічного реактивного навантажень. Алгоритм розрахунку параметрів компенсатора реалізовано у прозорому пакеті MatLab. Розраховано економічний ефект для різних компенсаторів і типів навантажень відповідно до актуальних цін на компенсатори і генератори. Як результат, для лінійних реактивних навантажень найбільш доцільно використовувати статичні синхронні компенсатори (СТАТКОМ) з прибутком 104.3 % на рік, для нелінійних реактивних навантажень найвідповіднішими є активні фільтри з прибутком 17.9 % на рік, для динамічних реактивних навантажень – динамічні компенсатори з прибутком 44.7 % на рік.

Ключові слова: компенсатор реактивної потужності; параметри якості електроенергії

ANALYSIS OF ELECTRICITY QUALITY PARAMETERS WITHIN INSTALLING REACTIVE POWER COMPENSATORS

I. VERBYTSKYI*, K. KHODAKOV

Department of Industrial Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The increase of the number of electronic devices connected to the AC power grid causes the increasing of the quantity of transient processes and the dynamic mode of consumed energy from the power grid. This problem increases reactive power energy generation that has a negative impact on power grid equipment and increases power losses when energy transporting to the consumers. Usually for decreasing reactive power reactive power compensations are used. Depend on reactive power type one of few common compensator types may be chosen for improving energy quality parameters especially power factor. In the paper cost and effectiveness of reactive power compensators are analyzed. Theoretical aspects of reactive power compensation are discussed. Electric power is separated on passive and active and requirements for compensator current based on energy quality parameters restrictions are proposed. Also effect of decreasing of a generator output power after reactive power compensation is taking to account. An electric energy analyzer as an effective tool for reactive power compensator type and power determining is proposed. The analyzer is manufactured and tested on few common loads. A simple algorithm for the compensator parameters calculation based on the analyzer data is developed. The power grid frequency deviation is taking to account during the calculations. The algorithm is implemented for common loads: linear reactive, non-linear reactive and reactive dynamic. A program software in MatLab is developed. An economic effect for different compensator and load types based on real compensators and generators prices is calculated. As result, for linear reactive load is more effective static synchronous compensator (STATCOM) with benefit 104.3 % per year, for reactive nonlinear load more appropriate to use active filter with benefit 17.9 % per year, for dynamic reactive load we can use dynamic compensator with benefit 44.7%. The developed program software and hardware device may be adopted for commercial use and implemented for improved compensator parameters calculation before its installation.

Keywords: reactive power compensator; electric energy quality parameters

Вступ

Підвищення ефективності використання електричної енергії забезпечується використанням компенсаторів реактивної потужності. Задача

компенсації реактивної потужності ускладнюється у зв'язку зі збільшенням споживачів з імпульсним режимом споживання електричної енергії, від чого виникають часті перехідні процеси під час яких обсяг і характер потужності весь час змінюється. Тому

актуальною задачею є моніторинг характеру енергії, що споживається від мережі для вибору параметрів компенсатора реактивної потужності, при встановленні якого досягається висока економічна ефективність системи компенсації реактивної потужності.

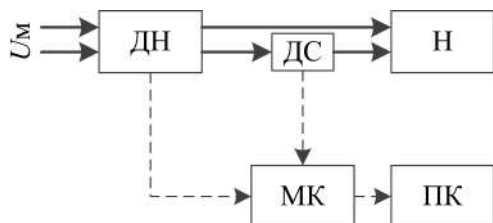


Рис. 1 – Структурна схема аналізатора параметрів електричної енергії

Для моніторингу характеру споживаної енергії від мережі використовуються аналізатори параметрів електричної енергії, структурну схему яких показано на рис. 1.

Структурна схема містить датчик напруги ДН і датчик струму ДС, які вимірюють значення напруги і струму відповідно через рівні проміжки часу Δt мікроконтролером МК, отримані дані надсилаються до портативного комп'ютера ПК, де обчислюється значення складових потужності спожитої від мережі енергії.

Для вибору компенсатора аналізуються такі параметри спожитої енергії:

- спектр виміряних значень струму і напруги мережі;
- складові потужності: повна S , активна P , реактивна Q , спотворення D і пасивна F [1];
- втрати в мережі та надлишкову потужність генератора, спричинених наявністю пасивної потужності;
- співвідношення параметрів, визначених у попередніх пунктах, на окремих періодах мережі.

Для повної компенсації реактивної потужності необхідно повністю компенсувати пасивну потужність F , але це не завжди доцільно, оскільки при цьому потужність компенсатора може бути надлишковою, що призведе до збільшення строку окупності системи. Така ситуація може виникнути в мережах з частими перехідними процесами, які призводять до коливання пасивної потужності в широкому діапазоні значень. У цьому випадку в певні інтервали часу в мережі з'являються аномально великі значення пасивної потужності, компенсувати які є недоцільним. Тому компенсатор реактивної потужності має бути розрахований на значення пасивної потужності що дозволяє компенсувати реактивну потужність протягом переважного часу роботи навантаження.

У загальному випадку вибір потужності компенсатора є задачею оптимізації, цільовою функцією якої може бути строк окупності системи, а обмеженнями – необхідні значення параметрів якості електроенергії [2]. У статті пропонується один з

можливих методів вибору потужності і типу компенсатора на основі вказаного підходу.

Мета роботи

У статті запропоновано методику визначення типу та параметрів компенсатора на основі моніторингу параметрів якості електроенергії з використанням аналізатора параметрів якості електроенергії.

Складові потужності

Головним завданням компенсатора є зменшення потужності втрат в мережі що визначаються пасивною потужністю F , яку часто називають реактивною потужністю Q [1] для нелінійних ланцюгів. При синусоїдальних процесах реактивна потужність (потужність зсуву) Q еквівалентна пасивній F , а потужність спотворення D рівна нулю.

Розрахунок реактивної потужності (потужності зсуву) Q , потужності спотворення D , пасивної потужності F здійснюється за формулами [1]:

$$Q = \sum_{k=1}^M U_k I_k \sin(\beta_l - \alpha_k); \quad (1)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} =$$

$$= \sqrt{\sum_{k \neq l}^M [U_k^2 I_l^2 + U_l^2 I_k^2 - 2 U_k I_l U_l I_k \cos(\varphi_l - \varphi_k)]}; \quad (2)$$

$$F^2 = Q^2 + D^2, \quad (3)$$

де I_l, U_k – діюче значення струму та напруги,

$$\varphi_l = \arctg\left(\frac{a_{l(l)}}{b_{l(l)}}\right), \quad \varphi_k = \arctg\left(\frac{a_{k(l)}}{b_{k(l)}}\right), \quad \beta_l, \alpha_k - \text{ фази}$$

струму та напруги, P, S – активна та повна потужності.

Аналіз доцільності компенсації реактивної потужності

У системах електропостачання, де в якості джерела використовується генератор напруги кінцевої потужності, втрати при передачі енергії від нього до навантаження пропорційні діючому значенню струму I_2 і складаються з суми втрат:

$$P_{em} = I^2 \cdot R_{\Sigma} = I_F^2 \cdot R_{\Sigma} + I_P^2 \cdot R_{\Sigma} = R_{\Sigma} \frac{F^2}{U^2} + R_{\Sigma} \frac{P^2}{U^2}, \quad (4)$$

де $F^2 = I_F^2 + I_P^2$ – опис значення діючого струму навантаження через складові струму що визначаються пасивною та активною потужністю, R_{Σ} – сумарний активний опір джерела та мережі, U – діюче значення напруги генератора.

Через те що потужність навантаження змінюється від періоду до періоду, значення повного I , пасивного I_F та активного I_P струмів також змінюється, тому їх доцільно розглядати як функції від номера періоду мережі n , $I(n)$, $I_F(n)$, $I_P(n)$. Очевидно що в такій системі компенсація пасивної потужності F призведе до зменшення втрат в лініях електромережі на величину ΔP_{em} :

$$\Delta P_{em}(n) = \left(I_F^2(n) - (I_F(n) - I_{ком}(n))^2 \right) R_{\Sigma}, \quad (5)$$

де $I_{ком}(n)$ – струм компенсатора.

За час експлуатації системи компенсації $t_{екс}$, що еквівалентний N періодам напруги мережі, зменшення витрат C_{em} при передачі енергії завдяки компенсації пасивної потужності визначають наступним чином:

$$C_{em} = C_e \sum_{n=1}^N \Delta P_{em}(n), \quad (6)$$

де C_e – вартість електроенергії.

Також компенсація пасивної потужності F знижує встановлювану потужність генератора на значення ΔP_G :

$$\begin{aligned} \Delta P_G &= \sqrt{F_{max}^2 + P_{max}^2} - \sqrt{(F_{max} - P_{кmax})^2 + P_{max}^2} = \\ &= U \left(\sqrt{I_{Fmax}^2 + I_{Pmax}^2} - \sqrt{(I_{Fmax} - I_{комmax})^2 + I_{Pmax}^2} \right), \quad (7) \end{aligned}$$

де $P_{кmax}$, P_{max} , F_{max} – максимальні значення потужності компенсатора, активної та пасивної потужностей протягом N періодів, та відповідних їм струмів.

Як правило вартість генератора досить часто пропорційна його потужності. Тому економія коштів від компенсації може бути розрахована за наступною формулою:

$$C_G = k_{II} \Delta P_G, \quad (8)$$

де k_{II} – коефіцієнт пропорційності.

Отже економічний ефект E від компенсації пасивної потужності складається із економії витрат на транспортування енергії C_{em} , зменшення вартості генератора C_G а також додаткових витрат на купівлю та експлуатацію компенсатора C_K :

$$\begin{aligned} E &= (C_G + C_{em}) - C_K = \\ &= \left(k \Delta P_G + C_e \sum_{n=1}^N \Delta P_{em}(n) \right) - C_K = \quad (9) \\ &= \left(k_{II} U \cdot \left(\sqrt{I_{Fmax}^2 + I_{Pmax}^2} - \sqrt{(I_{Fmax} - I_{комmax})^2 + I_{Pmax}^2} \right) + \right. \\ &\quad \left. + C_e \sum_{n=1}^N \left(I_F(n) - (I_F(n) - I_{ком}(n)) \right)^2 R_{\Sigma} \right) - C_K. \end{aligned}$$

Функція E в даному випадку є цільовою функцією задачі оптимізації економічного ефекту. Обмеженнями задачі оптимізації є параметри якості електричної енергії, які повинні відповідати стандарту якості електроенергії що діє в даній країні [3,4]. Цільова функція E є функцією двох параметрів: часу, який в даному випадку визначається кількістю періодів N , максимального струму компенсатора $I_{комmax}$. Очевидно що зі зростанням кількості періодів N , цільова функція E зростає. При $N=0$, значення цільової функції є від'ємним, $E = -C_K$. Зі зростанням кількості періодів роботи значення E зростає. Якщо за час безвідмовної роботи компенсатора N , значення цільової функції стає додатнім, то такий компенсатор доцільно використовувати в даній системі електроживлення.

Очевидно що значення цільової функції доцільно аналізувати лише за значенням струму компенсатора, а кількість періодів N визначати з часу безвідмовної роботи компенсатора, оскільки після цього виникають додаткові витрати на його технічне обслуговування або ремонт.

На періодах роботи системи електроживлення де пасивний струм менший за максимальне значення струму компенсатора, а значить може бути компенсований повністю, формула (9) має вид:

$$E = \left(k_{II} U \left(\sqrt{I_{Fmax}^2 + I_{Pmax}^2} - I_{Pmax} \right) + C_e R_{\Sigma} I_F^2(n) \right) - C_K, \quad (10)$$

а на інших періодах загальний вигляд формули (9) не зміниться. Тобто, в цілому, на основі формул (9) і (10), задача оптимізації економічного ефекту може бути вирішена. Однак для практичного використання запропонованої методики необхідно врахувати неявну залежність вартості та типу компенсатора, який доцільно використовувати для компенсації, від параметрів якості електроенергії та характеру пасивної потужності F , які регламентовані стандартами якості електроенергії. Оскільки постачальник несе відповідальність при порушенні норм якості параметрів електроенергії, він зацікавлений у проведенні заходів для покращення їх якості, одним з яких є встановлення компенсаторів. Аналіз впливу параметрів електроенергії на вибір компенсатора наведено в наступному розділі.

Особливості вибору типу компенсатора від параметрів якості електроенергії

Стандартизовані параметри якості електричної енергії (ПЯЕ), наприклад згідно з ГОСТ 13109-97, є такими [4]:

- усталене відхилення напруги $\delta_{U\phi}$;
- розмах зміни напруги $\delta_{U\phi}$;
- доза флікера P_f ;

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ;
- коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$;
- коефіцієнт несиметрії напруги K_{2U} ;
- відхилення частоти Δf ;
- тривалість провалу напруги t_n ;
- імпульсна напруга U_{imp} ;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{перU}$.

Обмеженнями які впливають на вибір компенсатора як правило є вміст вищих гармонік, який характеризується такими інтегральними показниками як: коефіцієнт гармонік K_G , коефіцієнт спотворення THD , коефіцієнт потужності K_P , поліпшення значень яких неявно покращує інші ПЯЕ через зменшення навантаження на електричну мережу.

Розрізняють наступні типи компенсаторів:

1. Статичні компенсатори. Які складаються з конденсаторних батарей, реакторів з тиристорними ключами, найбільш ефективно працюють в лінійних ланцюгах, усувають лише реактивну складову по першій гармоніці. Покращують коефіцієнт потужності, зменшують коефіцієнт спотворення, коефіцієнт несиметрії, провали напруг [5,6]. Є доволі дешевими, оскільки складаються лише з реактивних елементів та невеликої кількості напівпровідникових ключів, зазвичай тиристорів;

2. Активні фільтри, що використовуються для нелінійних ланцюгів, окрім реактивної потужності першої гармоніки компенсують потужність спотворення. На відміну від конденсаторних установок активні фільтри додатково зменшують коефіцієнт гармонічних складових, дозу флікера, перенапругу, відхилення напруги [7-9]. Топології таких компенсаторів містять велику кількість ключів, як правило IGBT – транзисторів високої вартості;

3. Активні фільтри з динамічною компенсацією. На відміну попереднього виду ще ефективніші при перехідних процесах. Краще реагують на зміну навантаження [10-12]. Побудовані також на IGBT – транзисторах, але з кращими динамічними характеристиками, та в результаті – ще більшої вартості.

В електричних ланцюгах з струмом близьким до синусоїдального, вміст вищих гармонік мінімальний. Тому в таких мережах доцільно використовувати статичні компенсатори, оскільки вони мають найменшу вартість. А в ланцюгах з нелінійними навантаженнями використовувати активні фільтри зі звичайною чи динамічною компенсацією.

Тому з урахуванням обмежень на ПЯЕ алгоритм вибору параметрів компенсатора ускладниться та складатиметься з декількох етапів:

1. Розрахунок коефіцієнта потужності K_P , через середньоквадратичні значення струму першої гармоніки I_{1rms} та всього сигналу I_{rms} , величину кута

фазового зсуву між струмом та напругою першої гармоніки ϕ_1 :

$$K_P = \frac{I_{1rms}}{I_{rms}} \cos \phi_1, \quad (11)$$

2. Перехід до пункту 3 якщо розраховане значення коефіцієнта потужності K_P задовольняє умову $K_P < 0.95$, в іншому випадку використання компенсатора є недоцільним;

3. Розрахунок середнього значення вмісту вищих та інтергармонік [13] через певний інтегральний показник що регламентується в стандарті якості параметрів електроенергії, в даному дослідженні використовується коефіцієнт гармонік K_G , що розраховується за значенням коефіцієнта потужності K_P після компенсації ($K_P = 0.95$):

$$K_G = \frac{\sqrt{1-K_P^2}}{K_P} = \frac{\sqrt{1-0.95^2}}{0.95} = 0.3287, \quad (12)$$

4. Якщо значення цього параметра не перевищує регламентований, то використовується статичний компенсатор, та вирішується задача оптимізації згідно з формулою (9), інакше перехід до пункту 5;

5. Аналіз ваги перехідних процесів W_I виміряних значень струму, що здійснюються за формулою:

$$W_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{N-1} |I_d^2(n+1) - I_d^2(n)|}}{I_{d\Sigma} \sqrt{2N}}, \quad (13)$$

де $I_d(n), I_d(n+1)$ – діюче значення струму за період n та $n+1$, $I_{d\Sigma}$ – діюче значення струму всіх періодів.

Розробка аналізатора ПЯЕ

Для вирішення поставленої задачі потрібний недорогий та компактний (мобільний) аналізатор якості ЕЕ. Швидкодія якого має бути достатньою для аналізу вищих гармонік, відповідно до ГОСТ 13109-97 [3], та складає близько 10 кГц. Для коректного аналізу вмісту інтергармонік, розрахунок параметрів має відбуватись відразу на всьому проміжку аналізованих даних, з чого випливає вимога щодо збереження аналізованих даних, та до обсягу внутрішньої пам'яті.

Існуючі на ринку аналізатори ПЯЕ здійснюють розрахунок ПЯЕ за значеннями, виміряним за певний період час, та усереднюють їх на заданому проміжку часу (наприклад для аналізатора VR1710 це 1с – 20 хв), а також містять в собі додаткові функції (аналіз дози флікера, функції осцилографа, реєстрація провалів та викидів напруг, синхронізація часу по GPS, визначення мінімальних та максимальних

значень параметрів), що для даної задачі є надлишковими. Для вирішення поставленої задачі найкраще використовувати реєстратори напруги та струму [14-16], а саму обробку виконувати на комп'ютері з використанням власноруч написаного програмного забезпечення. Вартість реєстраторів напруги та струму також визначається їх програмним забезпеченням, яке для даного дослідження не використовуватиметься. Тому актуально розробити своє схемотехнічне рішення, яке відповідатиме описаним вище вимогам.

Для реалізації алгоритму вибору параметрів компенсатора, на основі структурної схеми, зображеної на рис. 1, пропонується схемотехнічне рішення, структурну схему якого зображено на рис. 2.



Рис. 2 – Структурна схема аналізатора

Структурна схема містить давач напруги (ДН) та давач струму ДС, для узгодження їх з вимірювальним колом мікроконтролера МК за амплітудою встановлені подільник напруги та трансформатор струму відповідно. Оскільки вимірювальні сигнали мають двополярну форму, а живлення МК є однополярним, для можливості вимірювання їх значення, вихідні сигнали давачів піднімаються на певний рівень за допомогою схем підняття рівня. МК, основними вузлами якого є ADC (Analog-to-digital converter, аналого-цифровий перетворювач) для зчитування сигналів давачів, SPI та UART для передачі сигналів до карти пам'яті КП, та через гальванічну розв'язку до персонального комп'ютера ПК, де відбуваються розрахунки по описаному вище алгоритму. Також передбачена можливість швидкої заміни КП, для аналізу декількох мереж.

Особливості практичного застосування запропонованої методики

Для практичного використання описаного вище алгоритму необхідним є визначення параметрів першої гармоніки в спектрі сигналу, де через нестабільність частоти напруги мережі, перша гармоніка не чітко виражена на своїй частоті, та визначається в певному діапазоні частот. Так як нестабільність частоти напруги мережі залежить від багатьох факторів, визначення впливу яких в окремі моменти часу є неможливим, то визначення діапазону

частот можливе за допомогою розрахунку середньоквадратичного відхилення σ відносно моди M нормального закону розподілу:

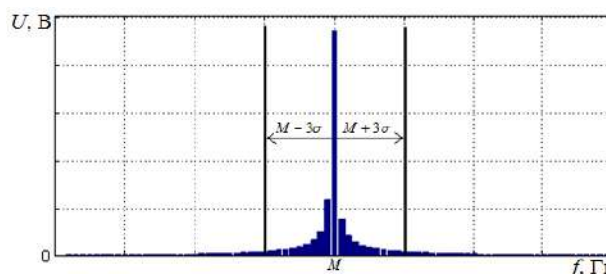


Рис. 3 – Ілюстрація прикладу визначення діапазону частот

При визначенні економічного ефекту E , формула (10), невідомими є коефіцієнт пропорційності k_{Π} та витрати на купівлю й експлуатацію компенсатора C_K , визначення яких можливе лише при аналізі вартості представлених на ринку генераторів відносно їх потужності, а також компенсаторів відносно їх типу та потужності.

Для даного дослідження використовуються апроксимовані вартісні залежності (рис 4), отримані при аналізі ринкової вартості.

Експериментальні дослідження

Для дослідження запропонованої методики, за допомогою розробленого по структурній схемі, рис 2, аналізатора ПЯЕ, було проведено аналіз мережі, з чотирма видами навантаження: активного лінійного (рис. 5 а), лінійного активно-індуктивного, рис. 5 б), нелінійного активно-індуктивного, рис. 5 в) і динамічного активно-ємнісного, рис. 5 г).

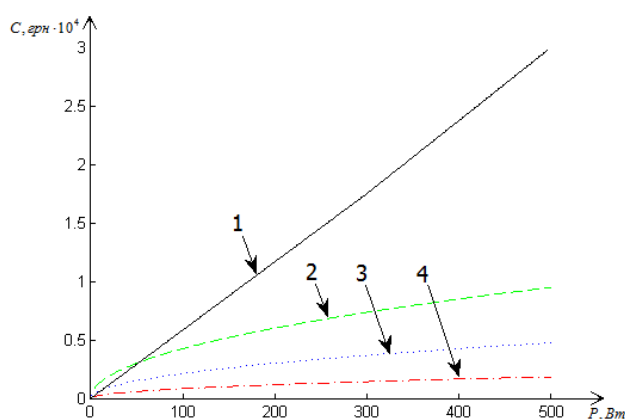


Рис. 4 – Залежності вартості 1 – генератора, 2 – активного фільтра з динамічним керуванням, 3 – активного фільтра, 4 – статичного компенсатора, від їх потужності

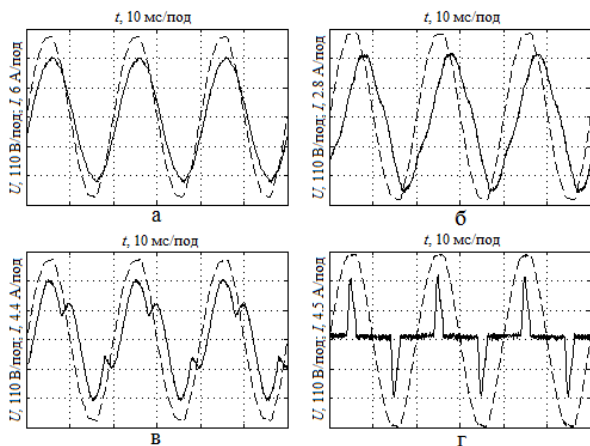


Рис. 5 Осцилограми струму '–' I та напруги '--' U досліджуваних навантажень, де а – лінійне активне, б – лінійне активно - індуктивне, в – нелінійне активно - індуктивне, г – динамічне активно - ємнісне

За допомогою реалізованого у Matlab описаного в статті алгоритму, для навантажень з характером споживаного струму зображеним на рис 5, було отримано результати, наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків

Етап алг.	Характер навантаження			
	лінійне активне	лін. активно-індуктивне	нелін. активно-інд.	динамічне активно-ємн.
1	$K_p = 0,96$	$K_p = 0,65$	$K_p = 0,91$	$K_p = 0,59$
2	$K_p > 0,95$	$K_p < 0,95$	$K_p < 0,95$	$K_p < 0,95$
3	-	$K_f = 0,181$	$K_f = 0,425$	$K_f = 1,390$
4	-	$K_f < 0,329$	$K_f > 0,329$	$K_f > 0,329$
5	-	-	$W_I = 0,05$	$W_I = 0,15$
	-	-	$W_U = 0,03$	$W_U = 0,03$

На основі даних наведених у табл. 1 можна зробити наступні висновки:

- лінійне активно-індуктивне навантаження потребує встановлення статичного компенсатора;
- нелінійне активно-індуктивне навантаження потребує встановлення активного фільтра;
- динамічне активно-ємнісне навантаження потребує встановлення активного фільтра.

Наступним етапом після вибору типу компенсатора є визначення його потужності, що проводиться на основі розрахунку економічного ефекту E , формули (9) та (10) для різних потужностей компенсатора при тривалості експлуатації протягом семи років. Отримані результати наведено на рис. 6, рис. 7, рис. 8, рис. 9 та рис. 10.

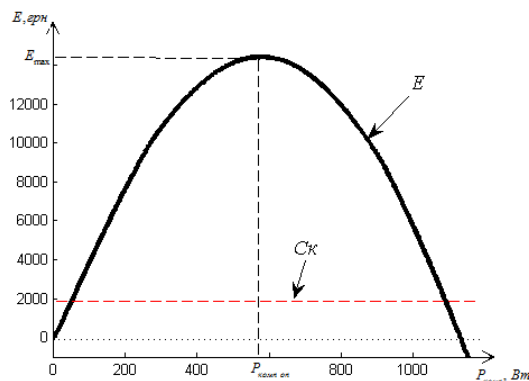


Рис. 6 – економічний ефект при встановленні статичного компенсатора для лінійного активно-індуктивного навантаження

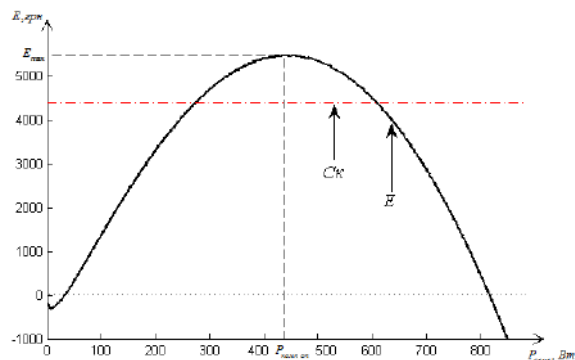


Рис. 7 – економічний ефект при встановленні активного фільтра для нелінійного активно-індуктивного навантаження

Для точнішої оцінки економічного ефекту E відносно вартості компенсатора C_K по зображеним вище рис. 6 – рис. 10 кривих економічного ефекту, розрахуємо щорічний економічний ефект $E\%$ відносно початкової вартості компенсатора, та величину коефіцієнта потужності при встановленні компенсатора потужністю $P_{комп. оп.}$.

Таблиця 2 – Результати розрахунків

Екон. еф.	E_{max} , грн	C_K , грн	$E\%$, %	K_p
рис. 6	14498	1985	104.3	0.9842
рис. 7	5521	4415	17.9	0.9993
рис. 8	3005	6377	6.7	1
рис. 9	20954	4357	68.7	0.9728
рис. 10	22067	7053	44.7	1

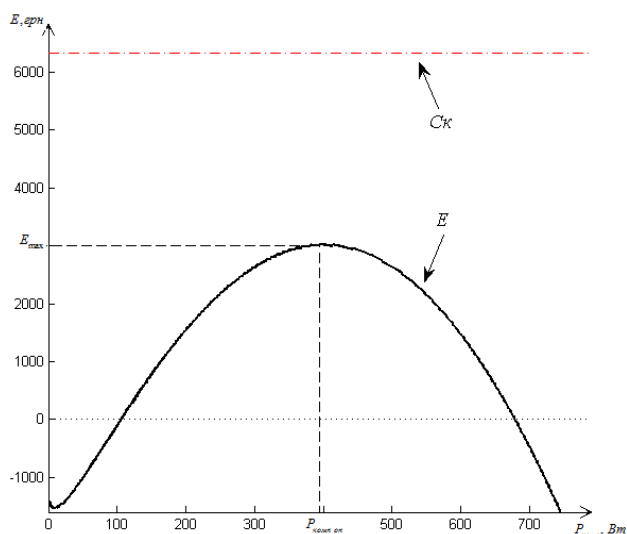


Рис. 8 – економічний ефект при встановленні активного фільтра з динамічним керуванням для нелінійного активно-індуктивного навантаження

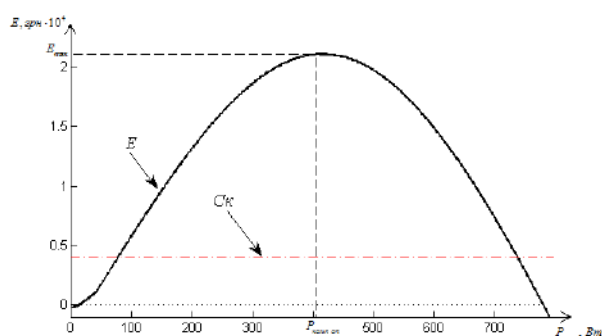


Рис. 9 – економічний ефект при встановленні активного фільтра для динамічного активно-ємнісного навантаження

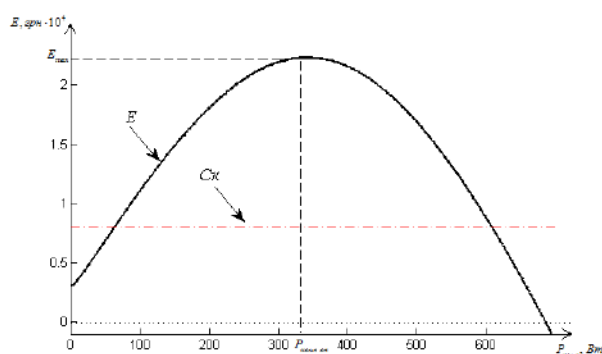


Рис. 10 – економічний ефект при встановленні активного фільтра з динамічним керуванням для динамічного активно-ємнісного навантаження

На основі зображених вище рис. 6 – рис. 10 та табл. 2 можна зробити наступні висновки:

- на кожному з рис 6 - рис 10, економічний ефект E має свій максимум E_{max} при потужності компенсатора $P_{комп оп}$, яка є оптимальною. Тому вибір потужності компенсатора має проводитись з врахуванням оцінки економічного ефекту;

- для нелінійного активно – індуктивного навантаження економічний ефект E_{max} та відносний економічний ефект $E\%$ більший при встановленні активного фільтра без динамічного керування, що пояснюється незначною величиною ваги перехідних процесів;

- для динамічного активно – ємнісного навантаження економічний ефект E_{max} більший при встановленні активного фільтра з динамічним керуванням, адже характер споживаного струму містить значну вагу перехідних процесів. Але відносний економічний ефект $E\%$ більший при використанні активного фільтра без динамічного керування, що пояснюється нижчою вартістю C_k відносно активного фільтра з динамічним керуванням.

Висновки

У статті розроблена система моніторингу параметрів електричної енергії мережі, призначена для вибору типу та потужності компенсатора реактивної потужності з максимальним економічним ефектом. Система складається зі спеціалізованого аналізатора параметрів електричної енергії, основними перевагами якого є компактність, наявність карти пам'яті, що збільшує тривалість моніторингу до одного місяця неперервної роботи. В результаті використання розробленого програмно-апаратного комплексу для трьох типів навантажень: лінійного реактивного, нелінійного реактивного та динамічного вдалося досягти щорічного економічного ефекту, що склав 104.3% для лінійного, 17.9% для нелінійного і 44.7% для динамічного навантаження від початкової вартості компенсатора.

Список літератури

1. Тонкаль, В. Е. Баланс энергии в электрических цепях / В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк, В. Я. Жуйков, В. Т. Стрелков, Ю. А. Яценко. – Киев: Наукова думка. – 1992. – 312 с.
2. Gheorghe, S. Power quality and improvement of the performance in electricity distribution system / S. Gheorghe, V. Branesu // CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems. – 2003. – P. 109-114. – doi: 10.1109/QSEPDS.2003.159805.
3. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. - Київ: Національний стандарт України, 2014. – 32 с.
4. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия и совместимость технических средств электромагнитная.

Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.

5. **Gawande, S. P.** Reactive power compensation of wind energy distribution system using Distribution Static Compensator (DSTATCOM) / **S. P. Gawande, N. A. Kubde, M. S. Joshi and B. S. Sudame** // *IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Delhi. – 2012. – P. 1-5. – doi: 10.1109/IICPE.2012.6450410.
6. **Joshi, B. S.** Reactive power flow control using Static VAR Compensator to improve voltage stability in transmission system / **B. S. Joshi, O. P. Mahela and S. R. Ola** // *International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, Jaipur. – 2016. – P. 1-5. – doi: 10.1109/ICRAIE.2016.7939504.
7. **Panchbhai, A.** Shunt active filter for harmonic and reactive power compensation using p-q theory / **A. Panchbhai, S. Parmar and N. Prajapati** // *International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, Chennai. – 2017. – P. 260-264. – doi: 10.1109/ICPEDC.2017.8081097.
8. **Mattar, J. R.** A single phase active filter as a harmonic compensator / **J. R. Mattar, J. C. Strutz, R. Hausmann, S. V. Oliveira, G. A. Péres** // *Brazilian Power Electronics Conference*, Gramado. – 2013. – P. 1234-1238. – doi: 10.1109/COBEP.2013.6785273.
9. **Bezhenar, V.** Multilevel inverter as var-compensator. / **V. Bezhenar, D. Mykolaets, V. Mykytyuk, T. Tereshchenko** // *Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv. – 2013. – P. 370-372. – doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552076.
10. **Zhuikov, V. J.** Reactive power compensation approach with dynamic mode of load current. / **V. J. Zhuikov, I. V. Verbytskyi, A. G. Kyselova** // *Technical Electrodynamics*. – 2018. – № 4. – P. 47-52. – doi: 10.15407/techned2018.04.047.
11. **Вербицький, С. В.** Компенсатор реактивної потужності у перехідних режимах / **С. В. Вербицький, Р. М. Прибудько, Д. О. Зінченко, М. О. Мацюк** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 2. – С. 121-125. – doi: 10.20998/2413-4295.2018.26.42.
12. **Zhuikov, V. J.** Features of compensation of a reactive power at the transient mode. / **V. J. Zhuikov, I. V. Verbytskyi, O. F. Bondarenko** // *IEEE Conferece Electric Power Networks (EPNet)*. – 2016. – P. 1-4. – doi: 10.1109/EPNET.2016.7999362.
13. **Miron, A.** Interharmonics analysis using Fourier Transform and virtual instrumentation // **A. Miron, M. Chindris, and A. Cziker** // *10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Lodz. – 2009. – P. 1-4. – doi: 10.1109/EPQU.2009.5318844.
14. **Repak, M.** Design of power quality analyzer / **M. Repak, A. Otcenasova, M. Regula, A. Boli and P. Belany** // *ELEKTRO*, Mikulov. – 2018. – P. 1-6. – doi: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398305.
15. **Subtirelu, G.** Power quality analyzer / **G. Subtirelu, M. Dobricianu, and M. Linca** // *10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest. – 2017. – P. 909-914. – doi: 10.1109/ATEE.2017.7905043.
16. **Paranhos, I.** Power energy meter in a low cost hardware/software / **I. Paranhos, F. Libano, J. Melchioris, O. Mano and A. Roenick** // *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg. – 2007. – P. 1-9. – doi: 10.1109/EPE.2007.4417341.

References (transliterated)

1. **Tonkal, V. E., Novoseltsev, A. V., Denysyuk, S. P., Zhuikov, V. Y., Strelkov, V. T., Yatsenko, Y. A.** Balans energii v elektricheskikh tsepyakh [Energy balance in electrical circuits]. Kiev: Naukova Dumka, 1992, 312.
2. **Gheorghe, S., Branescu, V.** Power quality and improvement of the performance in electricity distribution system. *CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems*, 2003, 109-114. – doi: 10.1109/QSEPDS.2003.159805
3. DSTU EN 50160: 2014. Kharakterystyky naprugy elektropostachannya v elektrychnykh merezakh zagalnoyi pryznachenosti [Characteristics of power supply voltage in electrical networks of general purpose]. Kyiv: National Standard of Ukraine, 2014, 32.
4. GOST 13109-97. Elektricheskaya energiya i sovmestimost tekhnicheskikh sredstv electromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh electrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electrical energy and technical compatibility of electromagnetic equipment. Standards of quality of electrical energy in general-purpose power supply systems]. K.: National Standard of Ukraine, 1999, 32.
5. **Gawande, S. P., Kubde, N. A., Joshi, M. S. and Sudame, B. S.** Reactive power compensation of wind energy distribution system using Distribution Static Compensator (DSTATCOM), *IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Delhi, 2012, 1-5, doi: 10.1109/IICPE.2012.6450410.
6. **Joshi, B. S., Mahela, O. P., Ola, S. R.** Reactive power flow control using Static VAR Compensator to improve voltage stability in transmission system. *International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, Jaipur, 2016, pp. 1-5. – doi: 10.1109/ICRAIE.2016.7939504.
7. **Panchbhai, A., Parmar, S. and Prajapati, N.** Shunt active filter for harmonic and reactive power compensation using p-q theory. *International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, Chennai, 2017, pp. 260-264. – doi: 10.1109/ICPEDC.2017.8081097.
8. **Mattar, J. R., Strutz, J. C., Hausmann, R., Oliveira, S. V. and Péres, G.A.** A single phase active filter as a harmonic compensator. *Brazilian Power Electronics Conference*, Gramado, 2013, 1234-1238, doi: 10.1109/COBEP.2013.6785273.
9. **Bezhenar, V., Mykolaets, D., Mykytyuk, V., Tereshchenko, T.** Multilevel inverter as var-compensator. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, 2013, 370-372, doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552076.
10. **Zhuikov, V. J., Verbytskyi, I. V., Kyselova, A. G.** Reactive power compensation approach with dynamic mode of load current. *Technical Electrodynamics*, 2018, 4, 47-52, doi: 10.15407/techned2018.04.047.
11. **B Verbytskyi, I., Prybudko, R., Zinchenko, D., Matsyuk, M.** A reactive power compensator in transient modes. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 26 (1302), 2, 121-125, doi: 10.20998/2413-4295.2018.26.42.
12. **Zhuikov, V. J., Verbytskyi, I. V., Bondarenko, O. F.** Features of compensation of a reactive power at the transient mode. *IEEE Conferece Electric Power Networks (EPNet)*, 2016, 1-4, doi: 10.1109/EPNET.2016.7999362.
13. **Miron, A., Chindris, M. and Cziker, A.** Interharmonics analysis using Fourier Transform and virtual instrumentation, *2009 10th International Conference on*

- Electrical Power Quality and Utilisation*, Lodz, 2009, 1-4, doi: 10.1109/EPQU.2009.5318844.
14. Repak, M., Otcenasova, A., Regula, M., Boli, A. and Belany, P. Design of power quality analyzer. *ELEKTRO*, Mikulov, 2018, 1-6, doi:10.1109/ELEKTRO.2018.8398305.
15. Subtirelu, G., Dobriceanu, M. and Linca, M. Power quality analyzer. *10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, 2017, 909-914, doi: 10.1109/ATEE.2017.7905043.
16. Paranhos, I., Libano, F., Melchior, J., Mano, O. and Roenick, A. Power energy meter in a low cost hardware/software. *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, 2007, 1-9, doi: 10.1109/EPE.2007.4417341.

Відомості про авторів (About authors)

Вербицький Євген Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри промислової електроніки, факультет електроніки, Київ, Україна; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

Ievgen Verbitskiy – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Ph. D., Assoc. Prof., The department of Industrial Electronics, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

Хоодаков Костянтин Анатолійович – студент, факультет електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Kostiantyn Khodakov – student, Faculty of Electronics of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Вербицький, Є. В. Аналіз параметрів якості електроенергії при встановленні компенсаторів реактивної потужності / **Є. В. Вербицький, К. А. Хоодаков** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – 45 (1321). – С. 234-242. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.32.

Please cite this article as:

Verbitskiy, I., Khodakov, K. Analysis of electricity quality parameters within installing reactive power compensators. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **45** (1321), 234-242, doi:10.20998/2413-4295.2018.45.32.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Вербицкий, Е. В. Анализ параметров качества электроэнергии при установке компенсатора реактивной мощности. **Е. В. Вербицкий, К. А. Хоодаков** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 234-242. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.32.

АННОТАЦІЯ Збільшення кількості електронних пристроїв, підключених до електросетей переменного току, збільшує частоту переходних процесів в мережі і обумовлює динамічний характер, спожитої з мережі енергії. Це явище збільшує обсяг генерування реактивної потужності, негативно впливає на обладнання електричної мережі і збільшує втрати енергії при її транспортуванні до споживача. Зазвичай для зменшення обсягу виробленої реактивної потужності встановлюють компенсатори реактивної потужності. В залежності від типу реактивної потужності встановлюють один з декількох можливих типів компенсаторів. В статті аналізується вартість і ефективність використання компенсаторів різного типу. В статті проаналізовані теоретичні аспекти компенсації реактивної потужності. Повна електрична потужність розділена на пасивну і активну, визначені обмеження по струму компенсатора в відповідності з вимогами до параметрів якості електроенергії. В дослідженні також ухвилено зменшення вихідної потужності генератора електросеті завдяки компенсації реактивної потужності. Предложено використання аналізатора параметрів якості електроенергії як ефективного засобу для визначення типу і потужності компенсатора. Аналізатор виготовлено і протестовано на декількох типах розповсюджених навантажень. Розроблено простий алгоритм для розрахунку параметрів компенсаторів реактивної потужності. При дослідженні ухвилено коливання частоти мережі в реальних електросетях. Алгоритм застосовано для таких навантажень: лінійної реактивної, нелінійної реактивної і динамічної реактивної навантажень. Алгоритм розрахунку параметрів компенсатора реалізовано в програмному пакеті MatLab. Розраховано економічний ефект для різних компенсаторів і типів навантажень в відповідності з актуальними цінами на компенсатори і генератори. Як результат, для лінійних реактивних навантажень найбільш цілесообразно використовувати статичні синхронні компенсатори (СТАТКОМ) з прибутком 104.3% в рік, для нелінійних реактивних навантажень найбільш підходящими виявляються активні фільтри з прибутком 17.9% в рік, для динамічних реактивних навантажень – динамічні компенсатори з прибутком 44.7% в рік.

Ключові слова: компенсатор реактивної потужності; параметри якості електроенергії.

Поступила (received) 20.11.2018